

3-12 HpFP プロトコルによる WINDS 衛星の回線品質検査

村田健史 山本和憲 パワランケン プラパン 鈴木健治 浅井敏男
菅 智茂 村永和哉 水原隆道 影林佑哉 柿澤康範 矢羽田将友

近年 TCP/IP ベースでの Gbps を超える超高速衛星通信プロトコル開発が進められており、TCP (Transmission Control Protocol) の改良による高速化が様々試みられている。しかし、静止軌道衛星や深宇宙探査衛星などは通信リンクにおける遅延量が大きい。また、Ka バンドや Ku バンドは気象等に起因するビットエラー発生確率が高くなる傾向にあり、IP 通信においてはパケットロスに結び付きやすい。パケットロス率が無視できない高遅延ネットワークにおいては TCP のスループットは大きく減少することがよく知られており、衛星リンクでの TCP 高速化は容易ではない。筆者らは、パケットロス率が無視できない高遅延ネットワークにおいても高い通信性能を発揮する通信プロトコル (HpFP) を開発している。HpFP をベースに開発した通信環境計測アプリケーション hperf により WINDS 衛星のベントパイプ中継モードで通信速度計測を実施したところ、シングルコネクションで理論上の最大値にほぼ等しい 1.6 Gbps を達成した。さらに、本研究では HpFP プロトコルを改良し、巡回冗長検査 (CRC) 機能を実装した。HpFP を用いて WINDS 衛星により誤り検出を行ったところ、衛星リンク上のスループットが 100 Mbps 程度までの通信では全パケットの誤り検出を行うことができることが分かった。本研究ではさらに、スループットが 10 Mbps における得られた誤り訂正検出率とパケットロス率の相関を調べた。

1 はじめに

来るべき超高速衛星通信 (ultra-high-speed satellite communication) 時代においては、静止軌道衛星を通じての高速データ伝送は有力な実用技術のひとつである。情報通信研究機構 (NICT) と宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は 1992 年にギガビット衛星 (gigabit satellite) として WINDS (Wideband InterNetworking engineering test and Demonstration Satellite) 衛星の共同開発を開始した。2008 年 2 月に打ち上げられた後の WINDS 衛星の Ka バンドにおける高速衛星通信技術目標のひとつは、IP ベースでの高いスループット (Gbps 以上) での高速データ通信の実現である。

WINDS 衛星には 2 種類のトランスポンダが搭載されており、それぞれ異なる通信モードを提供している。従来衛星で使用されていたベントパイプ中継モードでは、地球局から発せられたアップリンク信号の周波数を変換・増幅し、信号を地球局にダウンリンクする。再生交換中継モードでは、地球局から発せられたアップリンク信号を復調し、信号に対してベースバンドスイッチングを行い、変調信号を地球局にダウンリンクする。NICT ではこれまでに、独自開発の直接変復調装置 (モデム) を用いてベントパイプ中継モードに基づいたシングルポイントからシングルポイントへの衛星通信実験を行った。2014 年に WINDS 衛星ネット

ワークリンク上で UDP (User Datagram Protocol) によるデータグラム型の映像伝送実験で 3.2 Gbps (実効 2.75 Gbps) のスループットを実現した [1]。さらに 2016 年には、NICT が独自開発した HpFP によりデータストリーム型のデータ伝送実験により 2.6 Gbps を達成した [2]。

今後、地上の高速通信網を補完する静止衛星による超高速衛星通信という視点では、災害等の非常時に有効な頑健性と信頼性を備えたネットワーク性能が求められる。そのためには、衛星通信回線の品質が重要となる。符号誤り率またはビットエラー率 (BER: Bit Error Rate) とは受信した誤り符号の数を送信された符号の総数で割った値であり、テレメトリ品質の指標として衛星ネットワークの通常管理に用いられている。しかし BER は回線品質の指標であって、通信プロトコルにとって実用上必要な情報である IP パケットの到達率を直接表すわけではない。WINDS 衛星を含む一般の静止衛星通信サービスでは、ネットワークアプリケーションが BER などの衛星通信回線品質パラメータをリアルタイムに取得する方法がない。ネットワーク通信環境が健全な状態にあるかどうかをエンドユーザが把握するためには、衛星リンクの通信環境 (状態) 計測用の汎用的なツールが必要である。しかし、1 Gbps 以上の広帯域静止軌道衛星で利用可能である IP ベースのネットワーク計測ツールはこれまでに提

案されていない。

本研究では、NICT とクレアリンクテクノロジー社が開発してきた高速データ伝送プロトコル HpFP (High-performance and Flexible Protocol) [3] によるネットワーク環境計測ツール hperf [3] を改良し、衛星通信リンク上のパケットロス率計測機能及び巡回冗長検査機能を有するツールを提案する。さらに、WINDS 衛星においてその有効性を検証する。本稿の構成は以下のとおりである。2 において、筆者らが過去に実施した WINDS 衛星のベントパイプ中継モードにおけるデータ通信実験について紹介する。3 では hperf について説明し、巡回冗長検査による誤り検出機能を実装する。4 では新しい hperf により実際の WINDS 衛星回線環境の測定を行う。5 で全体をまとめ、今後の課題について議論する。

2 WINDS 衛星のベントパイプ中継モード データ通信実験

筆者らのグループは、2016 年 2 月に HpFP を用いたベントパイプ中継方式を使った WINDS 衛星通信実験を行った [2] (図 1)。本章ではこの結果をまとめ、ベントパイプ中継方式での WINDS 衛星回線における HpFP プロトコルの性能について議論する。

図 2 は実験システムであり、HpFP をベースに開発したネットワーク環境計測ツール hperf を用いて送信サーバから受信サーバへの伝送速度を測定した。中継機器としては、前節で述べた独自開発モデム (図 3) を用いた。図 4 は、図 2 の実験システムにおいて行った hperf によるスループット計測結果である。図 4 (b)、4 (c) では図 2 の戻り回線の遅延時間を 0 ミリ秒、250 ミリ秒及び 4,000 ミリ秒の場合を比較している。



図 1 2016 年 2 月の WINDS 衛星通信実験 (岐阜県中津川) の様子 : 実験中はおおむね晴天であった。

本稿では静止軌道衛星の遅延量 (RTT : Round Trip Time) に合わせ、主として戻り回線の遅延が 250 ミリ秒の場合について議論する。まず、図 4 (a) より、シングルコネクションでの HpFP プロトコルの最大通信速度は約 1.65 Gbps であることがわかる。HpFP は図 2 で用いたものと同程度のスペックの送受信サーバにおいて、ジャンボフレーム (パケットサイズが 9000 バイト) を用いることで約 10 Gbps のスループットの実績がある [3]。図 4 (a) の 1.65 Gbps の制約は図 3 のモデムの仕様がパケットサイズ (MTU : Maximum Transmission Unit) 884 バイト固定であることによる。一方、複数 HpFP のバルク通信では、図 4 (b) の 2 コネクション、図 4 (c) の 50 コネクションどちらの場合も、WINDS 衛星 (ベントパイプ中継モード) で達成できる上限の 2.56 Gbps に近いスループットを達成している。なお、図 1 に示すとおり実験当日は快晴であり、これらの計測においては HpFP によるパケットロス率 (PLR : Packet Loss Rate) はいずれの場合もほぼ 0 % であった。

3 HpFP の巡回冗長検査 (CRC) 機能

3.1 HpFP への巡回冗長検査機能実装

1 で述べたように、WINDS 衛星のデータ通信リンク上では通常の UDP によるエラー検出を行うことができない。衛星通信のような汎用性がない専用の通信機器を開発する際には、インターネットで利用されている中継機器のような充実した機能が設計、実装されとは限らない。特に、WINDS ベントパイプ中継モードで用いるモデム (図 3) では、UDP の CRC (Cyclic Redundancy Check) パケットヘッダは無視されるように設計されている。したがって、ユーザレベル (アプリケーション層) での誤り検出を行うことは困難である。

本研究では、HpFP に新たに巡回冗長検査 (CRC) 機能を実装することにより、誤り検出を行う。CRC には多数のバリエーションがあるが、HpFP では出力結果のビット幅が 16 ビットである CRC-16 の実装のひとつである CRC-16-IBM を用いる。HpFP では受信サーバは一定間隔 (200 ミリ秒ごと) に ACK を送信サーバに送出する [3]。HpFP ではこの間隔に受信側に到達したパケットの中でビットエラーを含むパケット数を送信側にレポートする。時刻ステップ i におけるエラー率は、この間に到達したパケット数を $N[i]$ とし、その中でエラーを含むパケット数を $M[i]$ とすると、 $M[i]/N[i] \times 100 (\%)$ で与えられる。なお、HpFP の CRC では 1 つのパケットに複数のビットエラーが含まれている場合もエラーパケットは 1 とカウントされる。

WINDSデータ伝送実験システムと利用システムイメージ

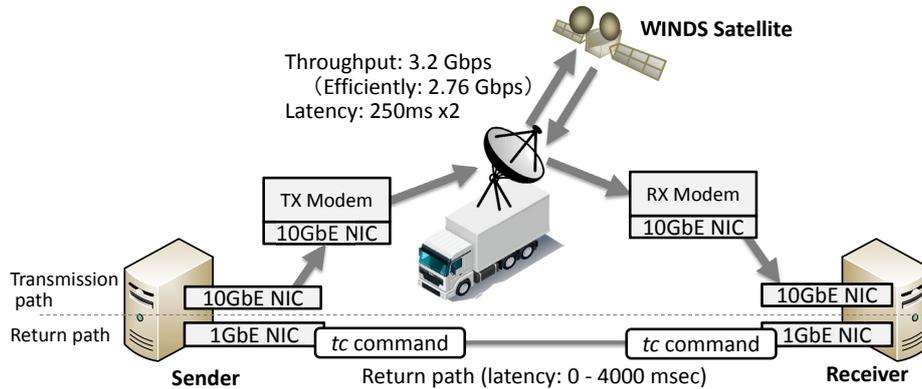


図2 WINDS衛星実験模式図

再構成通信機ダイレクト変復調装置 (モデム)

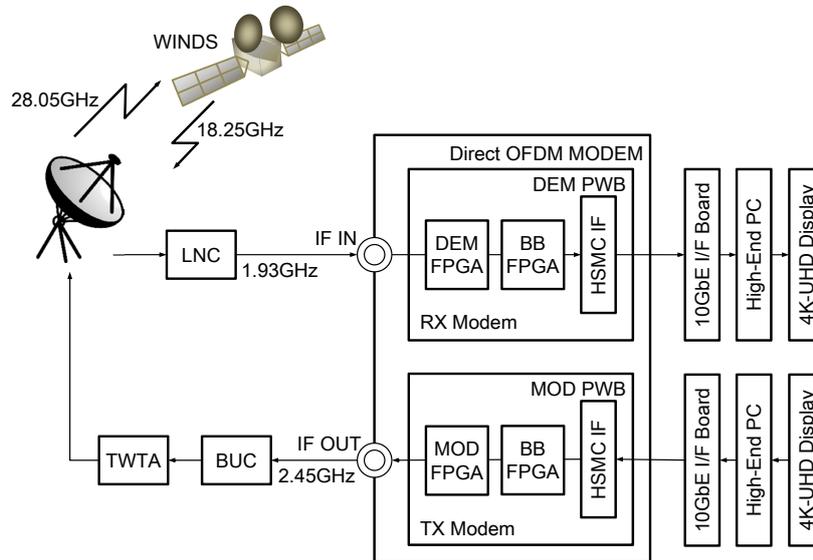


図3 WINDS衛星ベントパイプ中継モード用モデムシステム図

3.2 HpFPの巡回冗長検査機能のインターフェース

本研究の目的は、WINDS衛星のベントパイプ中継モードのリンク上で、hperfを使用してネットワークの状態を監視することである。ここでは、監視されたネットワークパラメータからネットワーク状態と障害の原因を特定することを試みる。アプリケーション層及びトランスポート層での定量的なネットワークリンクの品質確認方法は存在しないため、過去に行われたWINDS衛星のベントパイプ中継モード実験[1][2]では4Kビデオ伝送システムを使用してネットワーク状態を測定した。4Kカメラで送信機からの4Kビデオを転送し、受信機のモニターで映画の品質を目視で確認する。この方法では定量的な通信品質確認を行う

ことはできないが、定性的な品質確認を視覚的に行うことができるため実験回線品質の参照としては便利である。

上記のとおり、本研究ではHpFPプロトコルをベースに開発した実績のある広帯域(Gbps以上)ネットワーク環境計測ツールhperf[3]にCRC機能を追加した。hperfはこれまでに、インテルサット通信環境計測[4]、分散ストレージシステム計測[5]、気象レーダデータリアルタイム処理システム計測[6][7]などで成果を挙げており、実環境における計測性能は確認済みである。hperfは送信機(S)と受信機(R)の両方にセットアップし、プロセス間通信によりネットワーク環境を計測する。以下は、送信機と受信機のhperfの引数である。

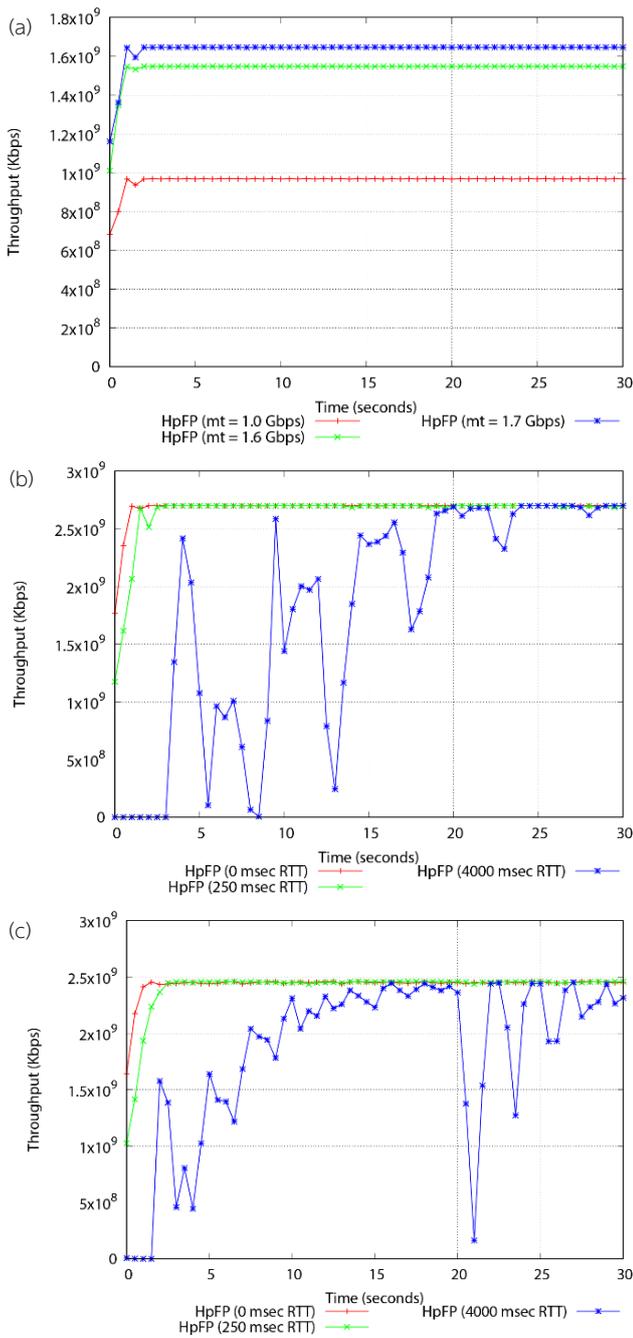


図4 WINDS 衛星実験における計測スループット：
 (a) 戻り回線の遅延が0ミリ秒の場合のシングルコネクションでのスループット (コネクションあたりの目標スループットは1.0 Gbps、1.6 Gbps 及び 1.7 Gbps)、(b) 戻り回線の遅延量が0ミリ秒、250ミリ秒及び4,000ミリ秒の場合の2重コネクションでのスループット (コネクションあたりの目標スループットは1.4 Gbps) (b) 戻り回線の遅延量が0ミリ秒、250ミリ秒及び4,000ミリ秒の場合の多重(50)コネクションでのスループット (コネクションあたりの目標スループットは54 Mbps)

```
S: ./hperf client <Receiver IP address> -bs
<buffer size of sender in unit of byte> -i
<interval of log output in unit of msec> -ss
<segment size of sender in unit of byte> -mt
<target throughput in unit of bps> -sb <sending
data size in unit of byte> -cpu <CPU ID used by
```

```
thread> -crc <interval of CRC check in unit of
packet> -o <output logfile name>
R: ./hperf server -bs <buffer size of receiver in
unit of byte> -cpu <CPU ID used by thread>
-crc <interval of CRC check in unit of packet> -i
<interval of log output in unit of msec> -o
<output logfile name>
```

-mt オプションは HpFP の目標スループットである。
 <target throughput in unit of bps> により目標値を設定する。これまでの研究 [8] により、静止軌道衛星通信を想定した遅延環境においてはパケットロス率 1 % 程度までであれば HpFP は 10 Gbps のスループットを達成できることがわかっている。新しい HpFP 機能では、-crc オプションにより巡回冗長検査 (CRC) を行う。引数 <interval of CRC check in unit of packet> において、何パケットごとにエラーチェックを行うかを定める。なお hperf の出力は <output logfile name> ファイルに保存される。次節以降では、この出力ログを解析する。本稿の WINDS 実験では、sysctl コマンドを使用してカーネルパラメータを設定し、バッファサイズ設定によるボトルネックを回避する。以下は、カーネルパラメータ設定値である。

```
net.core.somaxconn = 512
net.ipv4.tcp mem = 1073741824 1073741824
1073741824
net.ipv4.tcp wmem = 4096 16777216 1073741824
net.ipv4.tcp rmem = 4096 16777216 1073741824
net.ipv4.udp mem = 1073741824 1073741824
1073741824
net.core.wmem default = 16777216
net.core.rmem default = 16777216
net.core.wmem max = 1073741824
net.core.rmem max = 1073741824
net.core.optmem max = 16777216
```

4 WINDS 衛星実験

4.1 実験環境と予備実験

本節では、バントパイプ中継方式の WINDS 衛星通信において hperf により CRC 機能を実装した通信環境をモニタリングし、障害発生現象確認を行う。実験システムの概要図は図2と同じである。本研究では、将来の実用化を想定して戻り回線の遅延量を静止軌道衛星の250ミリ秒に固定している。また、HpFPの目標スループットは10 Mbpsとした。図5は実験時の大型車載局の様子である。実験は2016年12月に岐阜県中津川市で行ったが、本稿で議論する実験時間帯は常時曇天(一時的に雨天)であり、雲が途切れること



図5 2016年12月のWINDS衛星通信実験(岐阜県中津川)の様子:
実験中おむね曇天または雨天であった



図7 WINDS衛星による4K映像伝送試験(画面上にノイズが確認できる)

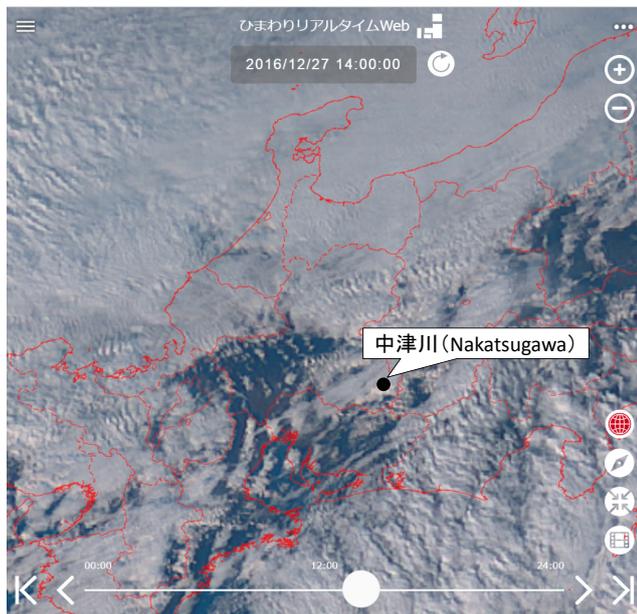


図6 ひまわりリアルタイムWebの実験当日(2016年12月27日)の雲の様子

がなかった。図6は、ひまわりリアルタイムWeb[9]の実験当日の雲の様子であり、中津川付近が雲で覆われていることがわかる。

まず予備実験として、通信回線品質を過去の実験[1][2]と同様に狭帯域 hperf(目標スループット10 Mbps)を伝送しながらの4K映像伝送(送信スループット2.6 Gbps)で確認したところ、受信映像にノイズが多くみられ(図7)、通信回線品質の低下を確認した。受信側で dstat コマンドでパケットをカウントしたところ受信スループットはおおむね1.3 Gbpsであったため、パケットロス率は全体で50%程度であったと考えられる。図8に予備実験での500ミリ秒ごとの hperf のログ出力結果を示す。図8(a)は hperf のスループット値の時間変化であり、Actual Throughput が受信側で計測した実効的なスループットを示している(本研究では、他のスループットは議論の対象としない)。図8(b)はパケットロス率(PLR)と遅延量(RTT)

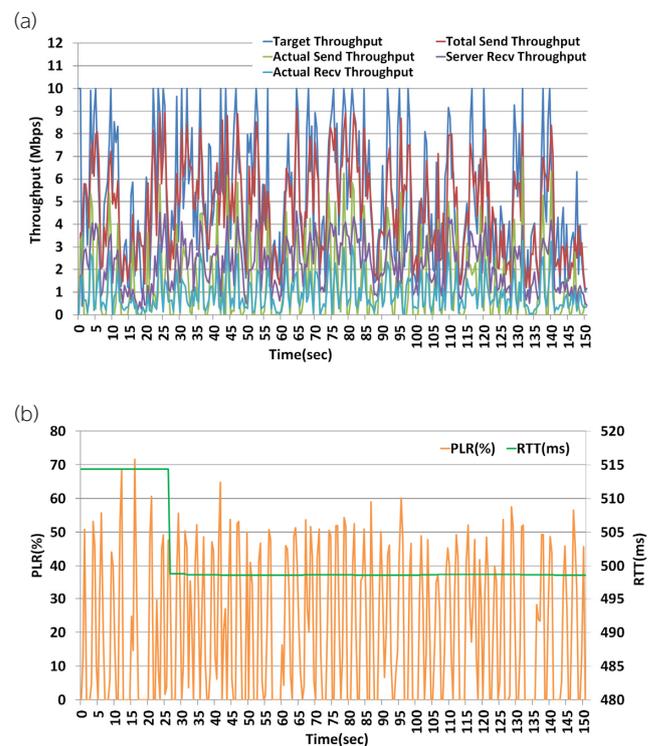


図8 予備実験結果:
(a) スループット、(b) パケットロス率(PLR)と遅延量(RTT)

の時間変化である。図8(a)においてスループットの実測値は10 Mbpsを大きく下回り、図8(b)においてパケットロスは最大で60%以上発生していることがわかる。この結果は、図4の結果と大きく異なり、通信障害が原因であると予想される。4.2においてこの原因を調べるため、-crc オプションを設定することでビットエラーについて調査を行う。

4.2 実験結果

4.2.1 通信障害非発生時

図9に4の実験のタイムスケジュールを示す。緑色は通信障害が発生しなかった場合(4.2.1、4.4で議論)、青色は通信障害が発生した場合(4.2.2で議論)

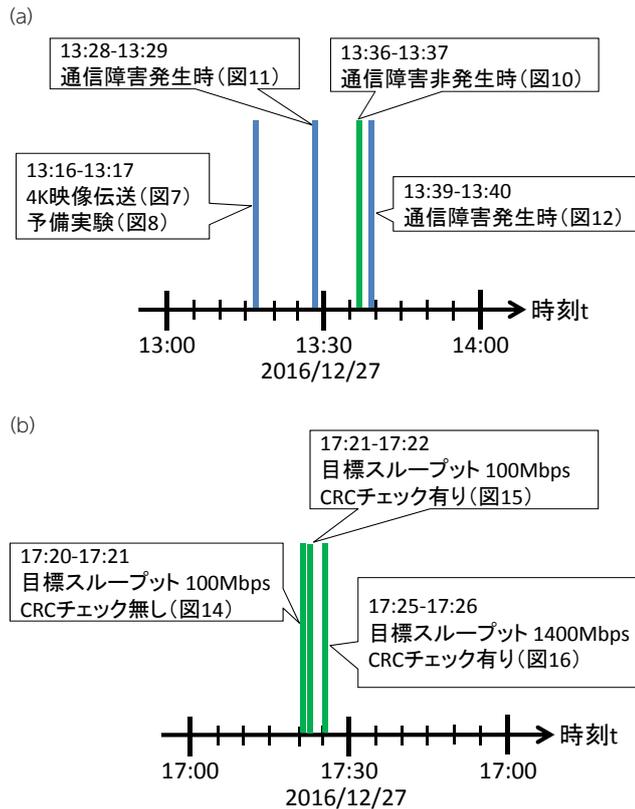


図9 WINDS衛星実験タイムスケジュール：
(a) 前半実験、(b) 後半実験

を区別して示している。図より実験中のネットワーク環境は一定ではなく、通信障害が発生したり発生しなかったりしたことがわかる。

図10に図9で通信障害が発生しなかった場合の計測結果を示す。図10(a)、(b)のフォーマットは図8(a)、(b)と同様である。図10の結果は図8の結果の20分後に取得したものである。なおこの時間中は曇天が継続しており、ひまわり衛星画像の様子もおおむね図6のとおりであった。

図10(a)の実効スループットは図8(a)とは異なりHpFPの目標スループットである10Mbpsをわずかに下回る程度であり、良好な結果であるといえる。図10(b)においてはパケットロスが発生しているものの継続的ではない。また、RTTは初期と終了時を除いてほぼ一定である。図10(a)のスループットの低下は、図10(b)に示されるパケットロス発生に伴っている場合が多い。

図10(c)はこの実験におけるCRCによる誤り検出数の時間変化である。検出は200ミリ秒ごとに行った。初期にわずかな誤り検出が行われているが、その後は誤り検出がほぼ0となっている。すなわち、図10(c)ではCRCによる誤り検出はわずかにしか発生していない。図10(b)のパケットロスの多くはビットエラーに起因しないロスであると考えられる。

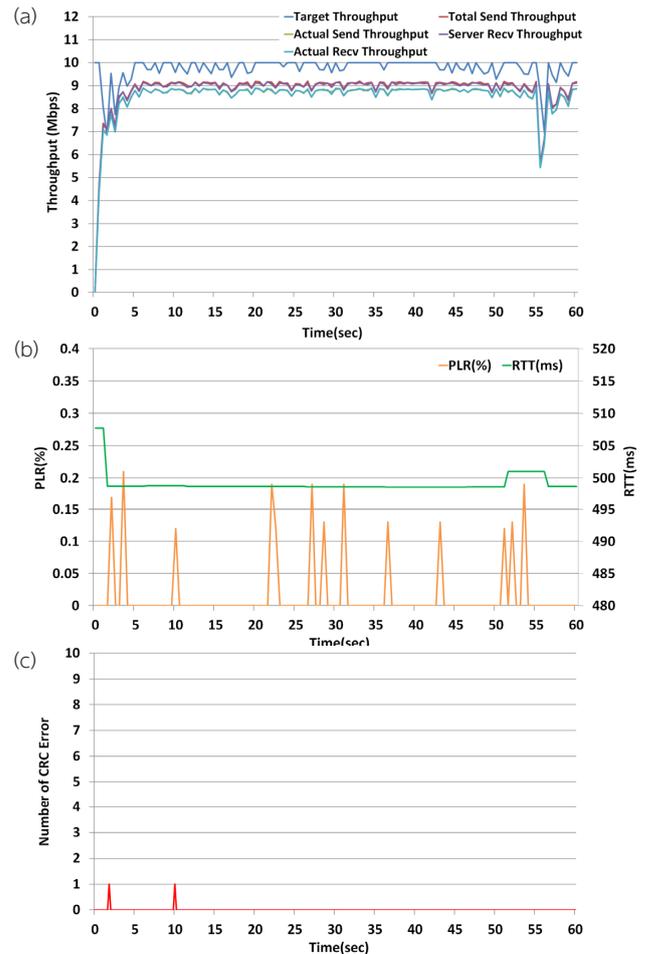


図10 通信障害非発生時実験

4.2.2 通信障害発生時

図11、12に図9で通信障害が発生した場合の計測結果を示す。図11の結果は図10の結果の8分前(したがって図8の12分後)に、図12の結果は図10の3分後に取得したものである。両図のフォーマットは図10と同じである。この実験は、時間的には図10の前後に行った実験である。したがって、WINDS衛星回線品質は短時間で変動したことになる。

図11(a)及び図12(a)の実効スループット結果は図8(a)と同様にHpFPの目標スループットである10Mbpsを大きく下回っている。これは、図11(b)及び図12(b)に示されるパケットロスによる影響が大きいと考えられる。HpFPは一定のパケットロス率においても高い通信性能を発揮する[3]が、遅延500ミリ秒の静止軌道衛星通信においてはパケットロス率が10%を超える場合にはスループットの低下がみられることがわかっている[8]。また図11(b)及び図12(b)では、RTTはほぼ500ミリ秒で一定である。これは図11(a)及び図12(a)のスループットの低下がモデムバッファやトランスポンダにおけるバッファあふれに起因したものではないことを示唆している。

図 11 (c) 及び図 12 (c) はこの実験における誤り検出数の時間変化である。データ取得間隔は図 10 (c) と同様に 200 ミリ秒である。図 10 (c) と異なり、図 11 (c) では 5 以下の、図 12 (c) では 15 以下の誤り検出が定常的なされたことがわかる。

4.3 相関

図 13 に、図 11、図 12 及び図 10 の (b)、(c) のパケットロス率と CRC による誤り検出数の相関を示す。両者のログ出力頻度は一致していない((b)は 500 ミリ秒、(c)は 200 ミリ秒)ため、相関評価は 1 秒平均値をそれぞれ計算して行った。図 11、12 及び図 10 のそれぞれの相関係数は 0.303、0.295 であり、相関係数は高い

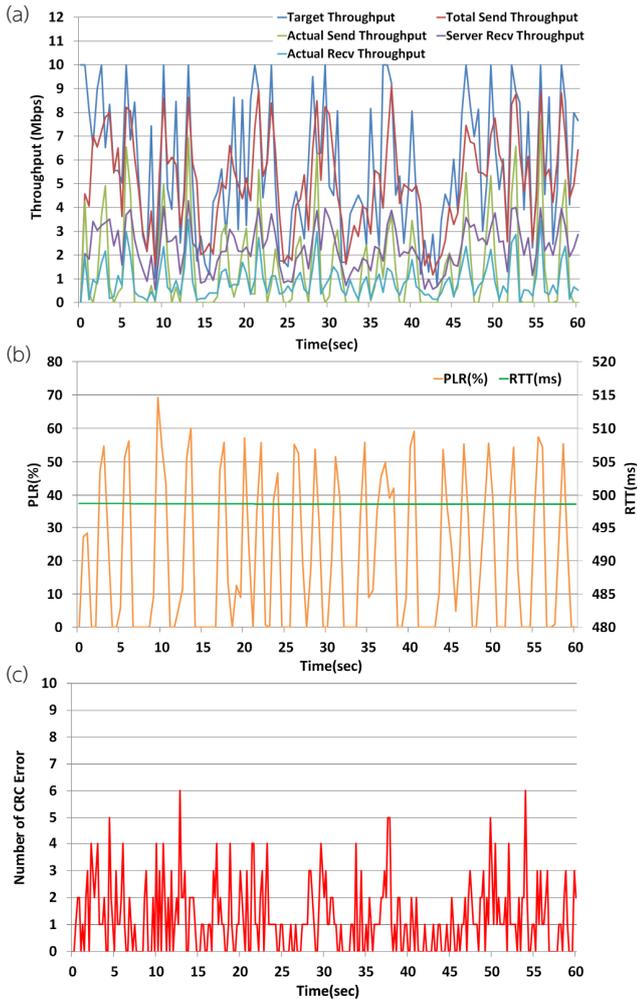


図 11 通信障害発生時実験結果 (1)

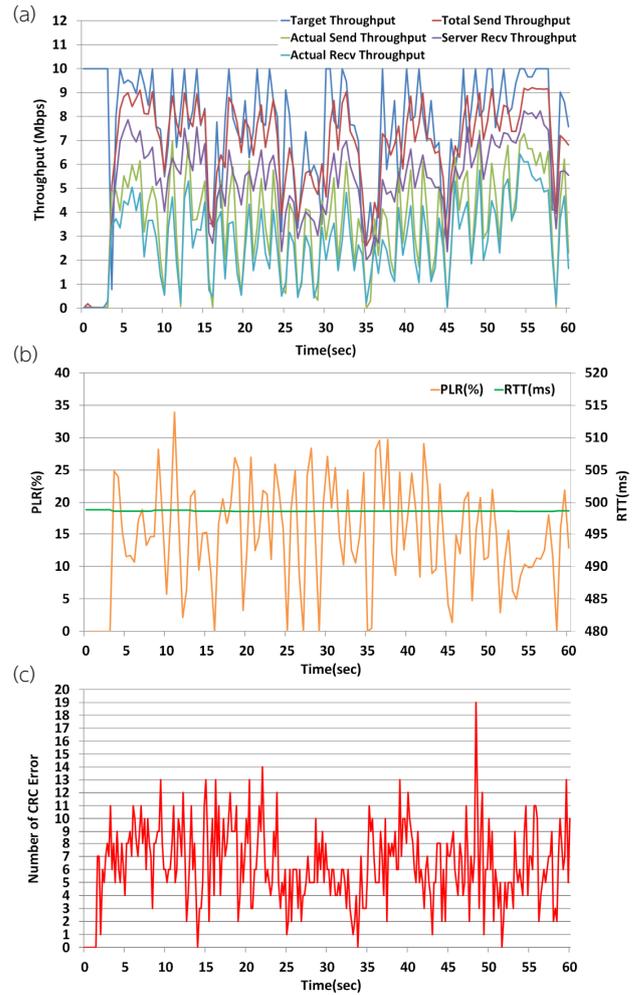


図 12 通信障害発生時実験結果 (2)

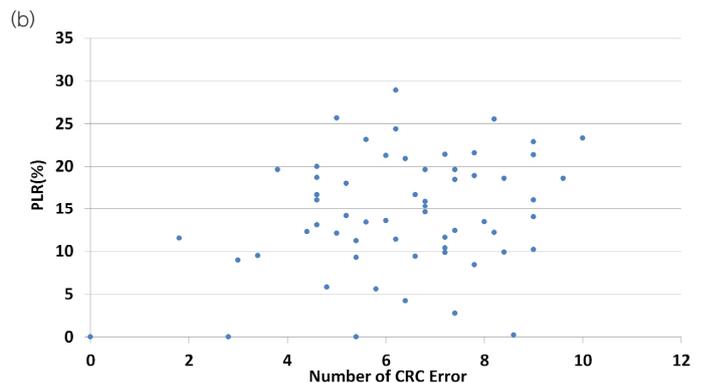
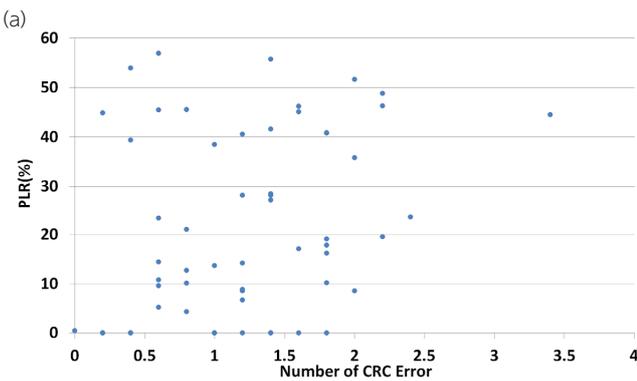


図 13 CRC 誤り検出数とパケットロス率の相関と相関係数 ((a) 0.303、(b) 0.295)

とはいえない。

4.4 スループット上限値

WINDS 衛星回線において、CRC により回線品質を調べながらデータ通信を行いたい場合がある。図 10 において目標スループットをおおむね達成しているこ

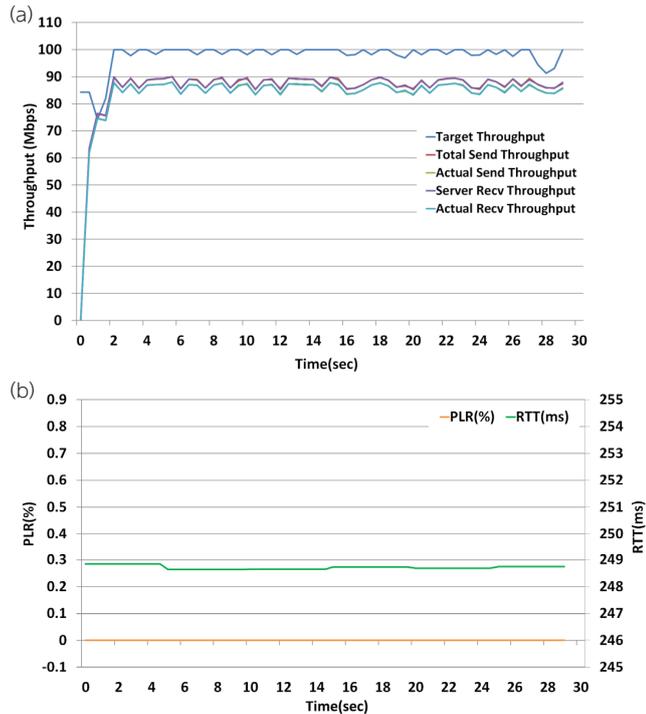


図 14 目標スループット 100 Mbps で CRC を行わなかった場合

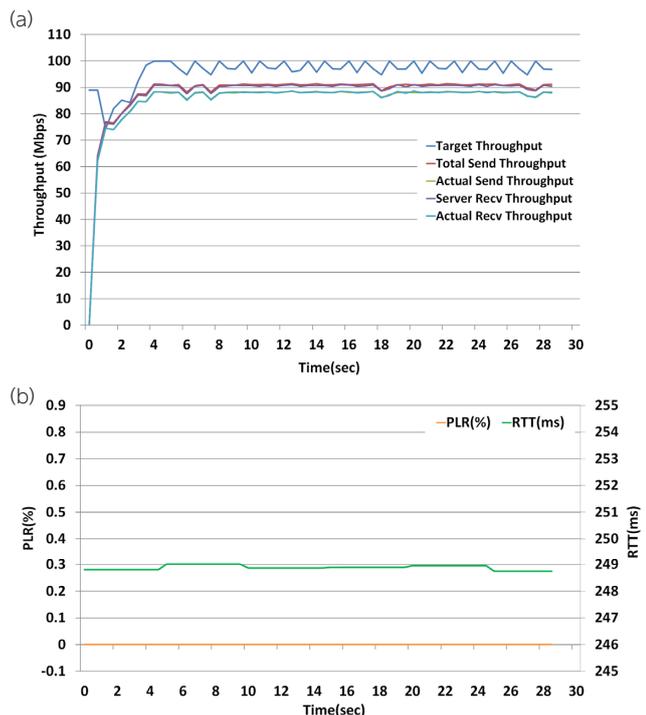


図 15 目標スループット 100 Mbps で CRC を行った場合

とから、回線品質が良好な場合には hperf により全パケットの CRC を行いながら 10 Mbps のデータ伝送を実現することが可能であることがわかる。本節では、hperf を用いて全パケットの巡回冗長検査を行う場合に伝送可能な HpFP の最大スループットを調べる。なお、本節で CRC を行った時間帯については、誤りはほぼ検出されなかった。図 14、15 は HpFP の目標スループットを 100 Mbps に設定した場合、図 16 は目標スループットを 1,400 Mbps に設定した場合の HpFP のスループットを示す。これらの図のフォーマットは図 8(a)、(b)と同じである。CRC を行わなかった図 14 (a) と CRC を行った図 15 (a) を比較すると、両者の結果には本質的な違いがなく、CRC の有無に関わりなく図 10 (a) と同様に目標スループットをほぼ達成している。一方で図 16 (a) では実効スループットは目標スループットを大きく下回っており、実効スループットは図 14 (a) や図 15 (a) と同程度である。

この結果より、WINDS 衛星回線においてデータ伝送を行いながら全パケットに対して CRC が可能な最大目標スループットは 100 Mbps であることがわかる。本節の議論から、本実験で用いた WINDS 衛星のベントパイプ中継モードでは短時間にネットワーク環境が大きく変動することがあり、データ通信の信頼性担保のためには CRC を行いながらのデータ伝送が必須である。したがって、データ到達の信頼性を確認しながら HpFP によりデータ通信を行う場合には、実効的な最大データ伝送速度は 100 Mbps であるといえる。

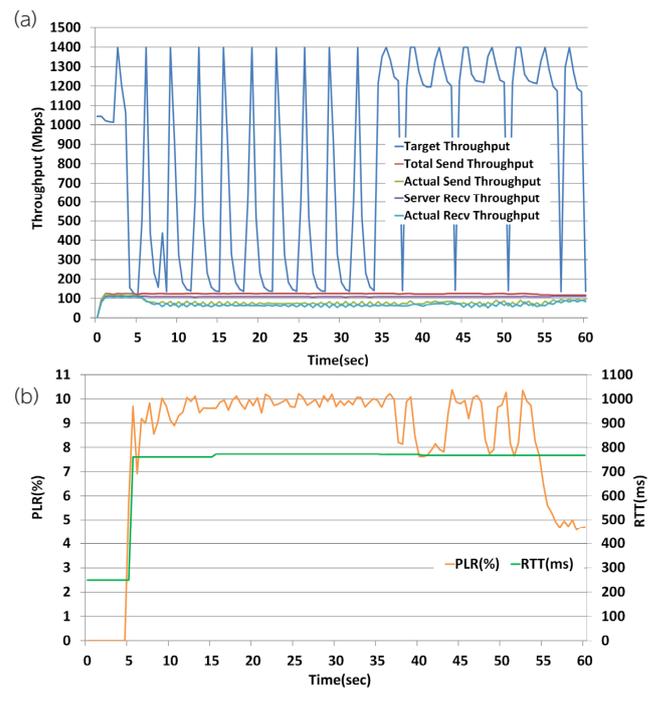


図 16 目標スループット 1400 Mbps で CRC を行った場合

5 おわりに

近年、TCP/IP ベースでの Gbps を超える超高速衛星通信プロトコル開発が進められており、TCP の改良による高速化が様々試みられている [10]-[13]。しかし、静止軌道衛星や深宇宙探査衛星などは通信リンクにおける遅延量が大きい。静止軌道衛星の遅延時間 (RTT) は 500 ミリ秒であり、月面までの RTT は 2.6 秒である。さらに深宇宙となる火星までは、最大で 13 分以上の RTT が必要である。Ka バンドや Ku バンドは X バンドや S バンドと比較して気象等に起因するビットエラー発生確率が高くなる結果、IP 通信においてはパケットロスが発生しやすい。パケットロス率が無視できない高遅延ネットワークにおいては TCP のスループットは大きく減少することがよく知られており、衛星リンクでの TCP 高速化は容易ではない。

筆者らは、パケットロス率が無視できない高遅延ネットワークにおいても高い通信性能を発揮する通信プロトコル (HpFP) を開発した [3][14][15]。HpFP は UDP を基に設計されているが、TCP 同様にパケット到達保証を行うトランスポート層の通信プロトコルである。WINDS 衛星実験で HpFP を用いた通信速度計測を行ったところ、シングルコネクションで理論上の最大値にほぼ等しい 1.6 Gbps を達成した。さらに本研究で HpFP を改良し、巡回冗長検査 (CRC) 機能を実装した。WINDS 衛星において誤り検出を行ったところ、WINDS 衛星リンクではスループットが 100 Mbps 程度までの通信では全パケットの誤り検出を行うことができることがわかった。

本研究ではさらに、スループットが 10 Mbps において得られた誤り訂正検出率とパケットロス率の相関を調べた。その結果、両者の相関は必ずしも高くなく、数 10 % のパケットロスが発生している時間帯であっても誤り検出率が低い場合があった。また逆に、誤り検出率が 0 でない時間帯にパケットロス率が 0 % となっていることもあった。相関評価は 1 秒間隔で行っており、その間に 1 万パケット以上が到達するために十分な時間分解能ではない。また、1 つのパケットに複数のビットエラーが発生してもパケットロス率には影響がないため、高いビットエラー時には両者の相関は低くなることが予想される。したがって、相関結果については評価方法の再検討が必要であると考えられる。また、システム上は同時計測はできないが、BER 測定と CRC 計測、パケットロス率計測を比較することで、衛星リンク品質がデータ通信に与える影響をより詳しく検討することが期待できる。

謝辞

実験にご協力いただいたクレアリンクテクノロジー社各位とホテルルートイン中津川インターに感謝します。この研究は、総務省 SCOPE (受付番号 165009001)、JSPS 科研費 JP15 K06129、JP17 K00158 及び JP17 HP8019 の成果の一部に基づいています。

【参考文献】

- 1 K. Suzuki, M. Yahata, M. Kato, T. Watanabe, K. Hoshi, T. Okui, S. Yoshikawa, M. Yoneda, Y. Arakawa, T. Asai, T. Takahashi, and M. Toyoshima, "16APSK/16QAM-OFDM 3.2Gbps RF signal directprocessing transmitter and receiver communication experiments using WINDS satellite," IEICE Technical Report, vol.115, no.241, SAT2015-40, pp.137-140, Oct. 2015.
- 2 K. T. Murata, P. Pavarangkoon, K. Suzuki, K. Yamamoto, Y. Nagaya, T. Asai, T. Kan, N. Katayama, M. Yahata, K. Muranaga, T. Mizuhara, A. Takaki, and E. Kimura, "A high-speed data transfer protocol for geostationary orbit satellites," in Proc. 2016 Int. Conf. Advanced Technologies for Communications (ATC), 2016, pp.425-430. doi: 10.1109/ATC.2016.7764819
- 3 K. T. Murata, P. Pavarangkoon, K. Yamamoto, Y. Nagaya, T. Mizuhara, A. Takaki, K. Muranaga, E. Kimura, T. Ikeda, K. Ikeda, and J. Tanaka, "A quality measurement tool for high-speed data transfer in long fat networks," in Proc. 24th Int. Conf. Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2016. doi: 10.1109/SOFTCOM.2016.7772111
- 4 P. Pavarangkoon, K. T. Murata, M. Okada, K. Yamamoto, Y. Nagaya, T. Mizuhara, A. Takaki, K. Muranaga, and E. Kimura, "Bandwidth utilization enhancement using high-performance and flexible protocol for INTELSAT satellite network," in Proc. 7th IEEE Annu. Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conf. (IEMCON), 2016. doi: 10.1109/IEMCON.2016.7746292
- 5 K. T. Murata, P. Pavarangkoon, K. Yamamoto, Y. Nagaya, K. Muranaga, T. Mizuhara, A. Takaki, O. Tatebe, and E. Kimura, "Multiple streams of UDT and HpFP protocols for high-bandwidth remote storage system in long fat network," in Proc. 7th IEEE Annu. Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conf. (IEMCON), 2016. doi: 10.1109/IEMCON.2016.7746276
- 6 K. T. Murata, K. Muranaga, K. Yamamoto, Y. Nagaya, P. Pavarangkoon, S. Satoh, T. Mizuhara, E. Kimura, O. Tatebe, M. Tanaka, and S. Kawahara, "Real-time 3D visualization of phased array weather radar data via concurrent processing in science cloud," in Proc. 7th IEEE Annu. Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conf. (IEMCON), 2016. doi: 10.1109/IEMCON.2016.7746347
- 7 K. T. Murata, P. Pavarangkoon, K. Yamamoto, Y. Nagaya, S. Satoh, K. Muranaga, T. Mizuhara, A. Takaki, and E. Kimura, "Improvement of real-time transfer of phased array weather radar data on long-distance networks," 2016 International Conference on Radar, Antenna, Microwave, Electronics, and Telecommunications (ICRAMET), Jakarta, 2016, pp.22-27. doi: 10.1109/ICRAMET.2016.7849575
- 8 K. T. Murata, P. Pavarangkoon, K. Yamamoto, Y. Nagaya, N. Katayama, K. Muranaga, T. Mizuhara, A. Takaki, and E. Kimura, "An application of novel communications protocol to high throughput satellites," in Proc. 7th IEEE Annu. Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conf. (IEMCON), 2016. doi: 10.1109/IEMCON.2016.7746274
- 9 村田健史, 武田康男, 菊池真似, "ひまわり 8号と地上写真からひと目でわかる 日本の天気と気象図鑑," 誠文堂新光社, 2017.
- 10 C. Caini and R. Firrincieli, "TCP Hybla: a TCP enhancement for heterogeneous networks," International Journal of Satellite Communications and Networking, vol.22, no.5, pp.547-566, 2004. doi:10.1002/sat.799
- 11 L. Del Consuelo Hernandez Ruiz Gaytan, Z. Pan, J. Liu, and S. Shimamoto, "Dynamic Scheduling for High Throughput Satellites Employing Priority Code Scheme," in IEEE Access, vol.3, pp.2044-2054, 2015. doi: 10.1109/ACCESS.2015.2495226
- 12 M. Sarkar, K. Shukla, and K. Dasgupta, "Delay resistant transport protocol for deep space communication," International Journal of

3 超高速衛星通信技術

Communications, Network and System Sciences, vol.4, no.2, pp.122-132, 2011. doi:10.4236/ijcns.2011.42015

- 13 H. Obata, K. Taira, and K. Ishida, "Implementation and evaluation of TCP-STAR: TCP congestion control method for satellite Internet," IEICE Transactions (Japanese Edition), J90, pp.566-576, 2007
- 14 村田健史, 長屋嘉明, 長妻努, "科学ビッグデータとサイエンスクラウド," 東海情報通信懇談会会報誌, 9月号, 2015.
- 15 村田健史, 水原隆道, 長屋嘉明, 村田健史, 長屋嘉明, 水原隆道, IoT/M2M 時代に向けた高性能遠隔制御のための通信プロトコル — 新しい社会システムデザインに向けた基盤通信技術の創出 —, 電波技術協会報 FORN, 2016年9月号, no.312, pp.6-9, 2016.



村田健史 (むらた たけし)

総合テストベッド研究開発推進センター
博士(工学)
情報ネットワーク、宇宙情報工学、福祉情報工学



山本和憲 (やまもと かずのり)

総合テストベッド研究開発推進センター
宇宙情報工学



パワランクン プラパン

総合テストベッド研究開発推進センター
Ph.D
光ネットワーク、高速データ転送プロトコル、IoT



鈴木健治 (すずき けんじ)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
主任研究員
衛星通信



浅井敏男 (あさい としお)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
衛星通信システム



菅 智茂 (かん ともしげ)

ワイヤレスネットワーク総合研究センター
宇宙通信研究室
研究員
博士(工学)
衛星通信、電波伝搬



村永和哉 (むらなが かずや)

株式会社セック
リアルタイム技術

水原隆道 (みずはら たかみち)

株式会社クリアリンクテクノロジー
LFN 通信プロトコル、暗号通信、IP リアルタイム通信

影林佑哉 (かげばやし ゆうや)

株式会社クリアリンクテクノロジー
LFN 通信プロトコル、通信符号化

柿澤康範 (かきざわ やすのり)

株式会社クリアリンクテクノロジー
LFN 通信プロトコル、機械学習



矢羽田将友 (やはた まさと)

NEC Corporation
衛星通信